

מציאות פיזיקלית, ייצוג מתמטי ועקרונות פילוסופיים על מאמר EPR והשפעתו

האם יש לדאות את תורת הקוונטים כמבנה מוגמר, או שמא יש בה פגמים המעידים על צורך לשנות אותה מן היסוד? ב־1935, עת מכניקת הקוונטים הייתה תיאוריה מצליחה בת כעשור, האבות המייסדים שלה היו חלוקים בשאלה זו, שגם כיום אין לה תשובה מוסכמת. בדיעבד ניתן לומר כי תפיסת מכניקת הקוונטים כתיאוריה מוגמרת התגלתה כשימושית מאוד לאורך תקופה של כחצי מאה במהלכה היוותה התיאוריה את הבסיס להתקדמות חסרת תקדים ששינתה את כל תחומי הפיזיקה; ובפרט הרחבת תורת הקוונטים לתורת שדות יחסותית אפשרה את פיתוח המודל הסטנדרטי של פיזיקת החלקיקים. הבסיס להתפתחויות אלו הונח עוד לפני 1935, ושנראו כבר אז באופק. עם זאת, הביקורות של פיזיקאים מרכזיים כאיינשטיין ושרדינגר על תורת הקוונטים, ועל הדרך המרכזית שבה הובנה, סיפקו את הבסיס להתפתחויות משמעותיות בהבנתנו את התיאוריה, את הדרכים האפשריות לפרש אותה ואת השלכותיה על תחומי מחקר רבים, ממדעי המחשב ועד פילוסופיה. משלל המאמרים והליפות המכתבים מהתקופה היא, מאמרם של אלברט איינשטיין, בוריס פודולסקי ונתן רוזן (EPR) שתרגומו מובא בגיליון זה הוא ללא ספק המשפיע ביותר. במאמר זה אתאר בקצרה השפעות מרכזיות של רעיונות פילוסופיים על הדיון בנושא שלמות תורת הקוונטים בתקופת כתיבת המאמר, ואת הקשר שלהם להשפעת המאמר בהמשך.

כשנה קודם לכן טען ורנר הייזנברג (Heisenberg 1934/1979,17) בנחרצות כנגד הטענות שתורת הקוונטים אינה שלמה¹ ולכן אינה סופית:

מכניקת הקוונטים אינה מותירה מקום לכל תוספת שהיא להיגדיה ... כל ניסיון לתקן את האי ודאות שבתורת הקוונטים על ידי תוספות ... יוביל לגיליון של סתירות בין מכניקת הקוונטים והתוספת המוצעת.

ברצוני להודות לימימה בן־מנחם, בנימין אייזר, לב ויידמן, יעקב סולומונס ואורלי שנקר. המחקר נתמך על ידי הקרן הלאומית למדע, מס' מענק 2064/19.

¹ טיעונו של הייזנברג נוגע לקו המפריד בין התחום המתואר על ידי תורת הקוונטים לבין התחום המתואר על ידי מושגים קלאסיים, קו שהכרחי לדבריו למתוח בכל מדידה, ושהוא המקום היחיד בתורת הקוונטים שבו מתקיים חוסר ודאות. טיעון זה הצטרף לטיעון משפיע יותר של פון־נוימן שפורסם בספרו (von Neumann 1932), שלפיו הניכויים ההסתברותיים של תורת הקוונטים אינם יכולים להוות ביטוי לתוצאות הנקבעות באופן דטרמיניסטי על ידי משתנים חבויים. גרטה הרמן (Hermann 1935/2016) הצביעה על טעות בהוכחתו של פון־נוימן, במאמר שלא זכה בזמנו לתשומת לב, ומאוחר יותר גם ג'ון בל (Bell 1966).

הרטוריקה של נחרצות ושל שינוי תפיסתי ופילוסופי בלתי הפיך הייתה חלק מרכזי מהצגת פירוש קופנהאגן של הייזנברג ונילס בוהר לתורת הקוונטים ותרמה להפיכתו לפירוש הדומיננטי (Beller 1999). משמעות שלמותה של תורת הקוונטים בפירוש קופנהאגן היא שהניבויים ההסתברותיים של התיאוריה (כלל בורן) כמו גם עקרון האי ודאות אינם מהווים ביטוי של ידע חסר על העולם, אלא ביטוי של מגבלה אפיסטמית יסודית. רעיון זה עלה בקנה אחד עם הפילוסופיה הפוזיטיביסטית שרווחה בתקופה זו, ובאה לידי ביטוי בגישתו של הייזנברג. לטענתו השאיפה לתיאור אובייקטיבי של העולם כרצף מאורעות במרחב ובזמן אינה בת מימוש. גם עבור בוהר תפיסת מכניקת הקוונטים כתיאוריה שלמה תרמה לטענה שתורת הקוונטים מחייבת שינוי פילוסופי מרחיק לכת, שהתבטא ברעיון הקומפלמנטריות. האופנים המקובלים לתאר מערכת פיסיקלית, לפי בוהר, אינם תיאור של המערכת כשהיא לעצמה. הקשרים ניסויים שונים מובילים לתיאורים שונים שאין לצפות שיעלו בקנה אחד זה עם זה, אלא יש לראותם כתיאורים משלימים. למשל, המושגים הקלסיים של גל ושל חלקיק מהווים בתורת הקוונטים תיאורים משלימים של אור (או של חומר), זאת אף שהם אינם יכולים לעלות בקנה אחד כתיאור האור כשלעצמו. כל אחד מתיאורים אלו עולה מתוך הקשר ניסויי אחר. התיאוריה שלמה אפוא, אבל כל אחת מאפשרויות התיאור השונות שהיא מציעה אינה כשלעצמה תיאור שלם.

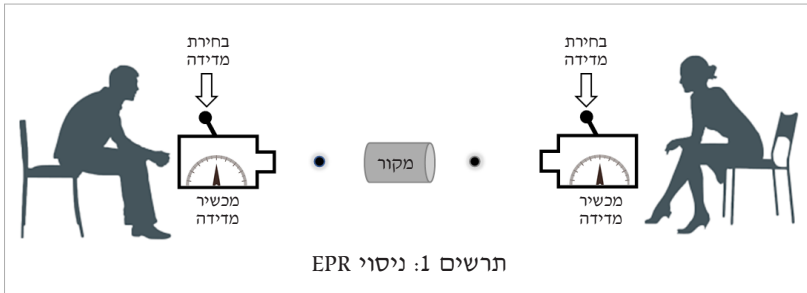
רעיון הקומפלמנטריות נתפס כביטוי של רעיונות קאנטיאניים, כאשר מושגים מהפיזיקה הקלסית ממלאים את התפקיד של הקטגוריות האפריוריות המהוות תנאי מקדים לידעה. הקשר לקטגוריות הקאנטיאניות נעשה בולט יותר בהמשך, כאשר התיאורים הקומפלמנטריים לבשו צורה של תיאור סיבתי לעומת תיאור במרחב-זמן. בכך ניתן לראות את רעיון הקומפלמנטריות כדרך טבעית להבין את עקרון האי ודאות מתוך אפיסטמולוגיה קאנטיאנית (Cuffaro 2010).²

מ־1927 ואילך הציג איינשטיין כמה טיעונים כנגד שלמות תורת הקוונטים שהתבססו על מספר ניסויי מחשבה.³ כיום המונח "ניסוי EPR" משמש לתיאור מגוון ניסויים שקוויהם הכלליים מתוארים בתרשים 1. המקור פולט זוגות של חלקיקים בכיוונים מנוגדים, כך ששני החלקיקים נקלטים במכשירי מדידה של שני נסיינים מרוחקים. בכל אחד מהצדדים ניתן לבחור את הגודל הנמדד: מאמר EPR מתאר מדידות מיקום ותנע, גרסה ידועה אחרת מבוססת על מדידות ספין או קיטוב פוטונים (Bohm 1951; Bohm and Aharonov 1957). בבסיס הניסויים עומדת התכונה הקוונטית

² גרסה שונה וידועה פחות של פירוש קופנהאגן הציגה באותן שנים הפילוסופית הניאוקאנטיאנית גרטה הרמן (Hermann 1933/2016; 1935/2016). אף שהרמן זיהתה טעות מתמטית בטענתו של פון־נוימן נגד משתנים חבויים, היא טענה שאין צורך במשתנים כאלה משום שראתה בתורת הקוונטים תורה סגורה סיבתית. טיעונו של הייזנברג שהוזכר לעיל הושפע מטענה זו שלה.

³ סקירה של הגרסאות השונות מופיעה אצל פיין (Fine 2017), סעיף 1.3.

הידועה היום בתור שזירה (Entanglement):⁴ כאשר שתי מערכות קוונטיות מקיימות אינטראקציה זו עם זו האינטראקציה תותיר אותן במקרה הכללי במצב קוונטי המשותף לשתייהן, שאינו מאפשר ייחוס של מצבים קוונטיים נפרדים לכל אחת מהן. בניסוי כל זוג חלקיקים נפלט מהמקור במצב שזור, ומצב זה נותר על כנו גם כאשר החלקיקים רחוקים זה מזה. השזירה גוררת קורלציה בין תוצאות המדידות של הנסיינים, הניתנת לניבוי בעזרת תורת הקוונטים.



בלב טיעונו של איינשטיין מתקופת EPR עומדת הטענה שבמקרה זה, ההנחה, שתואר מערכות פיזיקליות בעזרת פונקציית גל הוא תיאור שלם, אינה עולה בקנה אחד עם ההנחה שהמציאות הפיזיקלית באזור מסוים של המרחב אינה מושפעת מהמתרחש באזור מרוחק. הנחה אחרונה זו הוצגה לעיתים כשילוב של שני עקרונות: הינתנות להפרדה ולוקליות (Howard 1985).⁵ עקרון ההינתנות להפרדה (Separability) קובע כי בכל מקרה של שתי מערכות פיזיקליות מרוחקות זו מזו, ניתן לשייך לכל אחת מהן מציאות פיזיקלית משלה. עקרון הלוקליות קובע כי כל השפעה מתפשטת במרחב ברציפות במהירות שאינה עולה על מהירות האור. ההנחה שתיאור החלקיקים השזורים בעזרת מצב קוונטי משותף לשניהם הוא תיאור שלם, לפי איינשטיין, סותרת את שילוב העקרונות הנ"ל.

לפני EPR הופיעה תכונת השזירה בעיקר בהקשר של מדידה במכניקת הקוונטים, בנוגע לאינטראקציה המתרחשת בין חלקיק, למשל, למכשיר המשמש למדידת מיקומו. תגובותיהם של בוהר והייזנברג ל-EPR עסקו גם הן במצב זה. תגובתו של הייזנברג (Crull and Bacciagaluppi 2011), שנכתבה ב-1935, אך לא פורסמה בימי חייו, פורסת בפירוט את טיעונו המוקדם לטובת שלמות תורת הקוונטים ונגד

⁴ בעקבות מאמר תגובה של שרדינגר ל-EPR (Schrödinger 1935b).

⁵ גם במאמר EPR עקרונות אלו באים לידי ביטוי אף שאינם מוזכרים במפורש. עקרון הלוקליות מתבטא ב"הנחת היעדר האינטראקציה בין המערכות". את התפקיד של עקרון ההינתנות להפרדה ממלא המושג "אלמנט מציאות" (שאינו מופיע בגרסאות אחרות של טיעונו של איינשטיין).

האפשרות של משתנים חבויים. תגובתו של בוהר (Bohr 1935) העמידה במרכז את רעיון הקומפלמנטריות, ותקפה באמצעותו את קריטריון המציאות של EPR. בפרט, המילים "בלי להפריע בשום דרך למערכת" הן דור-משמעות בעיני בוהר: אמנם מדידה המבוצעת על אחת המערכות לא יכולה לגרום להפרעה מכנית במערכת השנייה, אבל עדיין, לפי בוהר,

ישנה השאלה של השפעה על עצם התנאים המגדירים את סוגי הניבויים האפשריים בנוגע להתנהגות המערכת בעתיד. מאחר שתנאים אלו מהווים רכיב אינהרנטי בתיאורה של כל תופעה הראייה לכינוי 'מציאות פיזיקלית', אנו רואים שהטעון של הכותבים הנ"ל אינו מצדיק את מסקנתם שתיאור המציאות במכניקת הקוונטים אינו שלם. (עמ' 700)

נקודה אחרונה זו מייצגת שינוי מחשבתי בהשקפתו של בוהר בעקבות EPR.⁶ קודם לכן האינטראקציה בין המערכת הקוונטית למכשיר המדידה הצטיירה בעיני בוהר ככרוכה בהפרעה בלתי נשלטת הנגרמת למערכת על ידי המכשיר. הפרעה זו היא הגורם לחוסר האפשרות שלנו לתאר מערכות קוונטיות באופן שאינו תלוי בהקשר הניסויי. הקשרים ניסויים שונים (למשל, מדידת מיקום או מדידת תנע) מתאימים לאופני תיאור שונים שבהם מתקיימת קומפלמנטריות. בעקבות מאמר EPR נימוק ההפרעה המכנית נזנח, והקומפלמנטריות הוצגה כתוצאה של מגבלה אפיסטמית יסודית יותר: לא ניתן לייחס משמעות לתכונה של מערכת כמו מיקום או תנע, בלי מדידה מתאימה שמספקת את ההקשר המתאים.

מהי כוונת טענת EPR כי תיאור מערכות פיזיקליות בעזרת פונקציית הגל אינו תיאור שלם? קריאה בטענות השונים של איינשטיין מראה שהם נבדלים לעיתים במסקנותיהם, ואף במאמר EPR מופיעות שתי מסקנות שונות: הראשונה (והפחות מוכרת כיום), היא כי "אפשר לשייך שתי פונקציות גל שונות לאותה המציאות". המילה "מציאות" כאן מכוונת לתכונות אובייקטיביות של חלקיק (או מערכת) בתחום מסוים במרחב ובזמן ואינן ניתנות לצפייה או למדידה ישירה. המסקנה מבוססת על מדידות שניתן לבצע על אחת מתוך שתי מערכות שזורות:

כתוצאה משתי מדידות שונות שבוצעו על המערכת הראשונה, המערכת השנייה יכולה להיוותר במצבים המתוארים על ידי שתי פונקציות גל שונות. עם זאת, כיוון שבזמן המדידה כבר אין אינטראקציה בין שתי המערכות, שום שינוי שמתקיים במציאות לא יכול להתרחש במערכת השנייה כתוצאה ממה שהנעשה למערכת הראשונה. (עמ' 425 לעיל)

המסקנה השנייה היא כי "תיאור המציאות הפיזיקלית שמספקת מכניקת הקוונטים באמצעות פונקציית הגל אינו שלם", כלומר ניבויי התיאוריה עצמם מעידים על קיומם של מרכיבים שהיא לא לוקחת בחשבון. במאמר EPR מסקנה זו נגזרת מהאפשרות

⁶ אם כי אין הסכמה לגבי משמעות השינוי (ראו למשל Cuffaro 1994; Beller and Fine 1994; Faye 1991). (2010).

למדוד כל אחד משני גדלים שמתקיימים ביניהם יחסי אי ודאות ("המתוארים באמצעות אופרטורים לא חילופיים").⁷

שתי הטענות עמדו בניגוד לדעה המקובלת,⁸ אך משמעותן שונה וכל אחת מובילה לדרכים אחרות לשינוי התיאוריה. מטענת האי שלמות משתמע כי מצבים שונים העשויים להתקיים במציאות יכולים להיות מיוצגים על ידי אותה פונקציית גל. מכאן נראה טבעי להסיק שיש להוסיף לפונקציית הגל משתנים נוספים שיאפינו את המצב הפיזיקלי שהיא מתארת. אך אף שטענת האי שלמות מובלטת במאמר EPR, ישנן עדויות שאינן שייך לא ראה באסטרטגיה זו (תיאוריות משתנים חבויים) דרך מועילה לפתרון בעיותיה של מכניקת הקוונטים (Fine 2017).

לעומת זאת, מהטענה הראשונה עולה כי המצב המתקיים במציאות אינו קובע את פונקציית הגל. טענה זו מתאימה לתפיסה אפיסטמית של פונקציית הגל הקוונטית, כלומר לתפיסתה כמאפינת ידע על המציאות (שעשוי להשתנות סובייקטיבית מצופה לצופה), ולא כמעוגנת במציאות עצמה. לאינשטיין היו התבטאויות מאוחרות יותר ברוח זו. טענה ראשונה זו אינה שלב הכרחי בדרך לטענת האי שלמות; ולכן העובדה שהטענה מופיעה ומודגשת במאמר EPR ובהתכתבות עם שרדינגר עשויה להעיד על החשיבות שאינשטיין ייחס לה בפני עצמה (Harrigan and Spekkens 2010). תפיסה אפיסטמית זו עשויה מצד אחד להוביל לחיפוש אחר תיאור חילופי של המציאות, כפי שאינשטיין ביקש בהמשך, או לחלופין לספקנות לגבי עצם האפשרות לבסס תיאור שכזה, והסתפקות בתיאוריה העוסקת בידע על מערכות פיזיקליות.

לעיתים מוצגת התנגדותו של אינשטיין למכניקת הקוונטים, ובפרט העמדה המובעת ב-EPR, כביטוי של שינוי בעמדותיו הפילוסופיות הכולל אימוץ של ריאליזם מדעי שהחליף ראייה פוזיטיביסטית. כתבים שונים של אינשטיין אכן עשויים להעיד על שינוי כזה בעמדותיו הפילוסופיות (Holton 1968; Fine 1996; Giovanelli 2018), אך כאן ברצוני דווקא לעמוד על יסוד חשוב המשותף לאופן שבו השפיעו תפיסות פילוסופיות שונות על עבודתו המדעית של אינשטיין בתקופות השונות.

שאלת היחס בין הייצוג המתמטי לבין המציאות הפיזיקלית המיוצגת, שמאמר EPR מעמיד במרכז כבר מהמשפט הראשון, היא שאלה שחזרה ועלתה בנקודות מפתח בעבודתו של אינשטיין לאורך השנים. למשל, התפיסה המהפכנית שהוצגה בתורת היחסות הכללית, של המרחב-זמן כאובייקט פיזיקלי דינמי המושפע מהחומר ומשפיע על תנועתו, התפתחה במידה רבה מתוך העיסוק של אינשטיין בשאלת ייצוג המרחב-זמן בעזרת מערכות קואורדינטות. אחד מעקרונות תורת היחסות הפרטית, שקדמה

⁷ במכתב לשרדינגר שנכתב מעט אחרי EPR הציג אינשטיין טיעון פשוט יותר המוביל לאותה המסקנה בהסתמך על מדידת גודל אחד בלבד, ואינו מערב את עקרון האי ודאות.

⁸ שרדינגר דן במעמדן של שתי הטענות במאמר "החתול" המפורסם, שנכתב מאוחר יותר באותה שנה בהשפעת EPR (Schrödinger 1935a).

לכללית, קבע כי קיימות מערכות קואורדינטות מועדפות שחוקי הפיזיקה לובשים בהן צורה אחידה. מערכות קואורדינטות אלו, הידועות כמערכות אינרציאליות, הן אוסף של מערכות הנעות במהירות קבועה זו ביחס לזו. לעומת זאת, מעבר למערכת קואורדינטות מאיזה אינו אינרציאלי, והוא משפיע על צורת החוקים. למרות הצלחתה של תורת היחסות הפרטית איינשטיין הוטרד מכך שחוקי הטבע "מבכרים" ייצוג מתמטי מסוים על פני ייצוג אחר, והחל לעבוד על פיתוח תיאוריה חדשה על ידי הכללת העיקרון למערכות מאיכות (Einstein 1907). המשך פיתוח תורת היחסות הכללית בשנים הבאות מתואר לעיתים כמאבקו של איינשטיין במערכות קואורדינטות (Giovannelli 2019), מאבק שהוביל אותו לבסוף לעקרון הקווריאנטיות הכללית. העיקרון קובע כי על חוקי הטבע להיות אינווריאנטיים לשינוי קואורדינטות כללי (Einstein 1916). בדיעבד (איינשטיין 2005 [1919], עמ' 140) הוא תיאר את מקור הצורך בהכללת עקרון היחסות הפרטי במילים:

מה לטבע ולמערכות הקואורדינטות שהונהגו על ידנו ולמצב תנועתן? אם אכן צריך, לשם תיאור הטבע, להשתמש באחת ממערכות הקואורדינטות שהנהגנו באורח שרירותי, אל תהיה בחירת מצב התנועה שלה כפופה לשום מגבלה; על החוקים להיות בלתי תלויים לחלוטין בבחירה זו.

עיקרון זה בתורת היחסות הכללית מביא לידי ביטוי דרישה ל"חד-משמעיות" (Eindeutigkeit), כלומר לקשר חד-משמעי בין הייצוג התיאורטי לבין מה שהוא אמור לייצג. בדרישה זו הושפע איינשטיין, ככל הנראה, מרעיונות קרובים שבוטאו באותה תקופה על ידי פילוסופים פוזיטיביסטים כמו יוזף פצולדט (Petzoldt), ארנסט מאך (Mach) ומוריץ שליק (Schlick), וגם על ידי ארנסט קסירר (Cassirer) ופול נטורפ (Natorp), מראשוני התנועה הניאו-קאנטיאנית (Howard 1992). גם את הדוגמה שבה פתח איינשטיין את הצגת תורת היחסות הפרטית (Einstein 1905) ניתן להבין בנקל באופן דומה: כאשר מגנט ומוליך מתקרבים זה לזה במוליך נוצר זרם חשמלי. אך ערכיהם של השדות האלקטרומגנטיים – הם המושגים התיאורטיים המסבירים את הופעת הזרם – תלויים בשאלה אם מתארים את הסיטואציה כמגנט המתקרב למוליך נח או כמוליך המתקרב למגנט נח. בכך תורת האלקטרומגנטיות כוללת שני תיאורים שונים למה שיש להבין כהתרחשות אחת. ההבנה שמדובר בתופעה אחת מנקודת המבט של צופים שונים מובילה לאחד משני עקרונות היסוד בתורת היחסות הפרטית. ניסוח עקרונות תורת היחסות הפרטית, תורת היחסות הכללית, וטיעוניו של איינשטיין נגד תורת הקוונטים, מונעים אפוא כולם על ידי חוסר נחת פילוסופי הכרוך בקיומם של ייצוגים תיאורטיים נבדלים למה שראוי להתפרש כמצייאות פיזיקלית אחת. את השינוי התפיסתי שביסס את ניסוחן של תורת היחסות הפרטית והכללית אפשר לראות כמבוסס על עצם הזיהוי של הייצוגים התיאורטיים השונים כשקולים זה לזה. את טענתו של איינשטיין כי פונקציות גל שונות מהוות תיאורים שונים של אותה המציאות אפשר לראות כמהלך דומה, ובכך ביקורתו של איינשטיין על תורת

הקוונטים מצטיירת בראש ובראשונה כניסיון להתקדם לעבר תיאוריה פיזיקלית טובה יותר בהתאם לרעיונות דומים לאלו שהוכיחו את הצלחתם כאשר שימשו אותם בפיתוח תורת היחסות הפרטית והכללית (וכוללים בין השאר מרכיבים של ריאליזם), ופחות כניסיון להשתמש בטיעונים מתחום הפיזיקה כדי להגן על תפיסה פילוסופית של ריאליזם אל מול פירוש קופנהאגן.

מעניין שאנלוגיה גלויה בין תורת הקוונטים לתורת היחסות הכללית הופיעה דווקא אצל בוהר, בפסקת הסיום למאמר התגובה שלו ל-EPR. אם איינשטיין הדגיש את אי תלותם של החוקים בבחירת מערכת קואורדינטות – הרי שבוהר הדגיש את התלות של הגדלים המדירים בבחירה זו. הוא ראה בכך אנלוגיה לאופן שבו מכשיר המדידה בתורת הקוונטים קובע את אופן התיאור הרלוונטי למערכת מבין אופני התיאור השונים שמתקיימת ביניהם קומפלמנטריות. השינוי הפילוסופי המתחייב ממכניקת הקוונטים, לדעת בוהר, תואם את השינוי הפילוסופי שהוא ראה כמתחייב מתורת היחסות. השינוי, בשני המקרים, נובע מהפער בין האופי הלא-קלסי של המציאות לבין הצורך להשתמש במושגים מהפיזיקה הקלאסית כדי לתאר את התופעות הנצפות. בוהר ואיינשטיין מציגים אפוא לא רק תפיסות אפיסטמולוגיות מנוגדות, אלא במובן מסוים גם גישות הפוכות בנוגע לכיוון ההשפעה הראוי שבין הפילוסופיה לפיזיקה. דווקא בוהר, האנטי-ריאליסט, רואה בהצלחתה של תיאוריה המבוססת על פורמליזם מסוג חדש עדות לצורך בשינוי תפיסה פילוסופי מקיף, המארגן מחדש את תפקידם ומשמעותם של מושגים כמו סיבתיות, ידיעה ותיאור. מנגד, איינשטיין מוצא בדיון הפילוסופי, הנסב על הפער בין הידע האמפירי לבין ההנחות התיאורטיות הנדרשות כדי להסביר אותו (ומתבטא במחלוקת בין גישות כמו ריאליזם ופוזיטיביזם), תמיכה בניסוח עקרונות המשמשים לבחינת תיאוריות מוצלחות ושינוי שלהן. רבים מנימוקיו של איינשטיין מנוסחים בלשון פוזיטיביסטית מובהקת המזהה את המציאות הפיזיקלית עם תופעות הניתנות לצפייה ולמדידה. עם זאת, השפעה פוזיטיביסטית זו משרתת דווקא הלך רוח מנוגד ורציונליסטי במהותו, במסגרתו חוסר נחת פילוסופי הוא בסיס ראוי לביקורת רעיונית על תיאוריה מצליחה אמפירית. הריאליזם של איינשטיין משמש גם הוא לאותה מטרה, ובכך הוא מנוגד לגישות המקובלות לריאליזם בפילוסופיה של המדע, הרואות בהצלחתה של תיאוריה עדות לאמיתותה. לסיכום אסקור בקצרה כמה השפעות מרכזיות של המאמר EPR וביקורת נוספת של איינשטיין על שלמות תורת הקוונטים היוו את נקודת המוצא של ריינולד בוהם, כאשר פיתח את הפירוש שלו לתורת הקוונטים (Bohm 1952). פירוש זה נחשב כיום לדוגמה המובהקת ביותר לאפשרות להבין את פונקציית הגל הקוונטית כתיאור לא שלם של המציאות. הפירוש של בוהם מראה כי ניתן לגזור את ניבויי תורת הקוונטים מן ההנחה שנוסף על פונקציית הגל קיימים חלקיקים נקודתיים בעלי מיקום ותנע מוגדרים הנעים במרחב בכל רגע. במקרה של שזירה, תיאוריה זו אינה מקיימת את

קריטריון הלוקליות של איינשטיין: תנועתו של חלקיק תלויה במיקומם של חלקיקים אחרים שאיתם הוא שזור, בלי קשר להפרדה המרחבית ביניהם.⁹ בעקבות עבודתו של בוהם, ג'ון בל ניסה לבדוק אם אי-לוקליות לא רצויה זו היא תכונה הכרחית של כל מודל של משתנים חבויים שיצליח לשחזר את הניבויים של מכניקת הקוונטים. את תשובתו החיובית לשאלה הוכיח בל בעזרת האי שוויונות המפורסמים שלו (Bell 1964). בל השתמש בווריאציה פשוטה על ניסוי EPR הכוללת שלוש מדירות אפשריות על ידי כל אחד משני הנסיינים, והראה שההנחה שתוצאות המדירות נקבעות באופן לוקלי על ידי משתנים חבויים עם ערכים לוקליים מובילה לאי שוויונות המופרים על ידי ניבויי תורת הקוונטים. מסקנתו של בל הייתה כי הקורלציות בין מערכות שזורות, הנמדדות בניסויים מהסוג שתואר לראשונה במאמר EPR, אינן ניתנות להסבר על ידי ההנחה שההסתברות לקבלת תוצאות שונות בניסוי מסוים נקבעת רק על ידי העבר הסיבתי של המדירות (כלומר על ידי אוסף המאורעות שמיקומם ותזמונם יאפשר להם להשפיע על המדידה על ידי הפרעה המתפשטת במהירות האור לכל היותר). ניבויי תורת הקוונטים הוכיחו את עצמם באינספור ניסויים מסוג זה.¹⁰ הקורלציות בין מערכות קוונטיות מרוחקות מעלות אתגר כפול: מצד אחד עולה הצורך בהסבר של עצם קיומן של קורלציות לא קלסיות אלו. מצד שני המבנה המתמטי של תורת הקוונטים מציב גם חסם עליון על גודלן של הקורלציות, המעלה את השאלה אם הוא מהווה ביטוי של עקרונות פיזיקליים פשוטים (Popescu and Rohrlich 1994). הקורלציות בניסויי EPR וניסויים דומים, יחד עם בעיית המדידה בתורת הקוונטים, הן בעיות מרכזיות בתחום יסודות תורת הקוונטים שמאז עבודתו של בל נהפך לתחום מחקר עצמאי ופורה בפיזיקה.

אם פירוש בוהם הדגים כיצד התיאור באמצעות פונקציית גל יכול להיות לא שלם, הרי שפירוש העולמות המרובים, המבוסס על עבודתו של יו אֶוֶרֶט (Everett 1957), הראה שהתיאור באמצעות פונקציית גל עשוי גם להיות שלם. מנקודת מבט פילוסופית, פירוש זה גם מראה שההבנה של תורת הקוונטים בדרך זו אינה מחייבת ויתור על ריאליזם מדעי. לפי פירוש העולמות המרובים פונקציית הגל היא אלמנט יסודי של המציאות ומשוואת שרדינגר היא חוק הטבע היסודי. על פי פירוש העולמות המרובים החלקיק הנוסף על פונקציית הגל בפירוש בוהם אינו נדרש לצורך הסבר התופעות הנצפות, ואפילו אם מניחים את קיומו – לפונקציית הגל חלק מכריע.

⁹ בניגוד למיקום, התנע המוגדר של החלקיק בפירוש בוהם אינו תואם בדרך כלל את הערך שיתקבל במדידת התנע, לכן גם פירוש זה אינו תואם את מסקנת EPR שהערכים הנמדדים נקבעו מראש על ידי אלמנט מציאות לוקלי.

¹⁰ מאז הניסויים הראשונים (Freedman and Clauser 1972; Aspect, Dalibard, and Roger 1982) נמדדו למשל קורלציות כפוטונים (Weihs et al. 1998) ובאטומים (Rosenfeld et al. 2017) בהפרדה דמויית-מרחב, פוטונים מכוכבים ממרחקים קוסמולוגיים (Handsteiner et al. 2017) ועוד.

בהסבר התופעות, ובמקרים מסוימים להסבר שהיא מספקת מבנה סיבתי ברור יותר מהסברים המבוססים על תנועת החלקיק (Vaidman 2005). פירושים אחרים¹¹ רואים בפונקציית הגל תיאור שלם אך מוסיפים תהליך פיזיקלי של קריסה שמסביר, בין השאר, את הקשר בין מדידות מרוחקות.

על פי פירושים אלו פונקציית הגל היא תיאור ישיר של המציאות הפיזיקלית, או לפחות של חלק ממנה. הטענה של EPR, שאפשר לשייך שתי פונקציות גל שונות לאותה המציאות, אינה מתקיימת בהם. ההנחה המובילה למסקנה שגויה זו היא הנחת ההינתנות להפרדה שאינה מתקיימת, ובמקרה של פירוש בוהם וחלק מתיאוריות הקריסה, גם הנחת הלוקליות.

דרך אחרת לפרש את פונקציית הגל היא לראות בה תיאור של ידע על המצב במציאות. במקרה זה הטענה הנ"ל תתקיים: צופים שיש להם ידע אחר על מציאות נתונה ישייכו לה פונקציות גל שונות. יש סיבות לחשוב שביקורתו של איינשטיין על תורת הקוונטים כיוונה לבניית תיאוריה כזו (Harrigan and Spekkens 2010). פירושים כאלו הם באופן כללי קשים לבנייה. מודלים ברוח זו קיימים רק עבור אוסף מצומצם של מערכות פשוטות (למשל Spekkens 2007; Lewis et al. 2012). נוסף על כך, קיימות הוכחות שבתנאים כלליים למדי, מודלים כאלה אינם יכולים להתיישב עם כלל ניבויי מכניקת הקוונטים.¹² גישות אפיסטמיות אחרות, שאינן נפסלות על ידי הוכחות אלו, משתמשות בהכללות של מושג האינפורמציה (Clifton, Bub, and Halvorson 2003; Bub and Pitowsky 2010) או בהסתברויות בייסיאניות (Caves, Fuchs, and Schack 2002). קיים ויכוח אם הן בהכרח מהוות ביטוי של עמדה אינסטרומנטליסטית, אנטי-ריאליסטית או לא (Ben-Menahem 2017).

מהפרספקטיבה של ימינו ברור כי טענת EPR, שלפיה גם התנע וגם המיקום חייבים להיות מוגדרים על ידי מרכיבים של המציאות שהיה להם קיום עוד בטרם המדידה, נדחתה על ידי הדרכים השונות המקובלות כיום להבין את תורת הקוונטים. עם זאת למאמר השפעה מרחיקת לכת על תחומים רבים, כאשר תרומתו הבולטת היא ניסוי המחשבה המתואר, שהציג את תופעת השזירה כתופעה פיזיקלית הראויה לדיון בפני עצמה. תופעה זו נהפכה מאז לאבן פינה הן של יסודות תורת הקוונטים והן של תחומי החישוב הקוונטי והאינפורמציה הקוונטית, והגרסאות השונות של ניסוי EPR עורן ממלאות תפקיד מרכזי בהתפתחות תחומים אלו. מעבר לכך, המאמר התווה דרכים להתמודדות עם אחד האתגרים המשמעותיים של הפילוסופיה של המדע בימינו. בעידן שבו הניסוח של התורות הפיזיקליות בעזרת מונחים מתמטיים כמו

¹¹ למשל Pearle 1976; Ghirardi, Rimini, and Weber 1986; Pearle 2008.

¹² התוצאה הידועה ביותר היא משפט PBR (Pusey, Barrett, and Rudolph 2012). לסקירה ראו Leifer 2014.

מרחבי הילברט, אגדי סיבים (fiber bundles) וחבורות סימטריה, מקשה על הניסיונות להבין בעזרת תיאוריות אלו את טבע המציאות ומונע היווצרות קונסנסוס בשאלות אונטולוגיות, המאמר הראה שעדיין ניתן וראוי לעסוק בשאלות כאלה והתווה דרכים חדשות לעשות זאת.

ד"ר גיא חצרוני

מכון כהן להיסטוריה ופילוסופיה של המדעים והרעיונות והמחלקה לפיזיקה, אוניברסיטת תל-אביב, והמחלקה למדעי הטבע והחיים, האוניברסיטה הפתוחה

ביבליוגרפיה

- איינשטיין, אלברט. 2005. "מהי תורת היחסות?" מתוך *רעיונות ודעות*, בעריכת יכין אונא, 138–141. ירושלים, מאגנס, האוניברסיטה העברית.
- Aspect, Alain, Jean Dalibard, and Gérard Roger. 1982. "Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers." *Physical Review Letters* 49 (25): 1804.
- Bell, John S. 1964. "On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox." *Physics* 1 (3): 195.
- . 1966. "On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics." *Reviews of Modern Physics* 38 (3): 447–52. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.38.447>.
- Beller, Mara. 1999. *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*. University of Chicago Press.
- Beller, Mara, and Arthur Fine. 1994. "Bohr's Response to EPR." In *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, edited by Jan Faye and Henry J. Folse, 1–31. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8106-6_1.
- Ben-Menahem, Yemima. 2017. "The PBR Theorem: Whose Side Is It On?" *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 57: 80–88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2016.11.004>.
- Bohm, David. 1951. *Quantum Theory*. Prentice-Hall.
- . 1952. "A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. I." *Physical Review* 85 (2): 166.
- Bohm, David, and Yakir Aharonov. 1957. "Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky." *Physical Review* 108 (4): 1070–76. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1070>.
- Bohr, Niels. 1935. "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" *Physical Review* 48 (8): 696–702. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.48.696>.
- Bub, Jeffrey, and Itamar Pitowsky. 2010. "Two Dogmas about Quantum Mechanics." In *Many Worlds?* Edited by S. Saunders, J. Barrett, A. Kent, and D. Wallace, 433–59. Oxford UP.
- Caves, Carlton M., Christopher A. Fuchs, and Rüdiger Schack. 2002. "Quantum Probabilities as Bayesian Probabilities." *Physical Review A* 65 (2): 6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.65.022305>.
- Clifton, Rob, Jeffrey Bub, and Hans Halvorson. 2003. "Characterizing Quantum Theory in Terms of Information-Theoretic Constraints." *Foundations of Physics* 33 (11): 1561–91. <https://doi.org/10.1023/A:1026056716397>.

- Crull, Elise, and Guido Bacciagaluppi. 2011. Translation of W. Heisenberg, "Ist eine deterministische Ergänzung der Quantenmechanik möglich?" <http://philsci-archiv.pitt.edu/8590/>.
- Cuffaro, Michael. 2010. "The Kantian Framework of Complementarity." *Studies in History and Philosophy of Science Part B – Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 41 (4): 309–17. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.04.003>.
- Einstein, Albert. 1905. "Zur Elektrodynamik bewegter Körper." *Annalen der Physik* 322 (10): 891–921. <https://doi.org/10.1002/andp.19053221004>.
- . 1907. "Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie." *Annalen der Physik* 328 (7): 371–84.
- . 1916. "Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie (The Foundation of the General Theory of Relativity)." *Annalen der Physik* 49 (4): 284–339.
- Everett, Hugh. 1957. "'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics." *Reviews of Modern Physics* 29 (3): 454–62. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.29.454>.
- Faye, Jan. 1991. *Niels Bohr: His Heritage and Legacy: An Anti-Realist View of Quantum Mechanics*. Springer.
- Fine, Arthur. 1996. *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*. University of Chicago Press.
- Fine, Arthur. 2017. "The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Summer 2020. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Freedman, Stuart J., and John F. Clauser. 1972. "Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories." *Physical Review Letters* 28 (14): 938.
- Ghirardi, Gian Carlo, Alberto Rimini, and Tullio Weber. 1986. "Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems." *Physical Review D* 34 (2): 470.
- Giovanelli, Marco. 2018. "Physics Is a Kind of Metaphysics: Émile Meyerson and Einstein's Late Rationalistic Realism." *European Journal for Philosophy of Science* 8 (3): 783–829. <https://doi.org/10.1007/s13194-018-0211-y>.
- . 2019. "Nothing but Coincidences: The Point-Coincidence Argument and Einstein's Struggle with the Meaning of Coordinates in Physics." <http://philsci-archiv.pitt.edu/16830>.
- Handsteiner, Johannes, Andrew S. Friedman, Dominik Rauch, Jason Gallicchio, Bo Liu, Hannes Hosh, Johannes Kofler, et al. 2017. "Cosmic Bell Test: Measurement Settings from Milky Way Stars." *Physical Review Letters* 118 (6): 60401.
- Harrigan, Nicholas, and Robert W. Spekkens. 2010. "Einstein, Incompleteness, and the Epistemic View of Quantum States." *Foundations of Physics* 40 (2): 125–57.
- Heisenberg, Werner. 1934/1979. "Recent Changes in the Foundations of Exact Science." In *Philosophical Problems of Nuclear Science*, 11–26. Fawcett Publications.
- Hermann, Grete. 1933/2016. "Determinism and Quantum Mechanics." In *Grete Hermann – Between Physics and Philosophy*, edited by Elise Crull and Guido Bacciagaluppi, 223–37. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-024-0970-3_14.
- . 1935/2016. "Natural-Philosophical Foundations of Quantum Mechanics." In *Grete Hermann – Between Physics and Philosophy*, edited by Elise Crull and Guido Bacciagaluppi, 239–78. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-024-0970-3_15.

- Holton, Gerald. 1968. "Mach, Einstein, and the Search for Reality." *Daedalus* 97 (2): 636–73. <http://www.jstor.org/stable/20023833>.
- Howard, Don. 1985. "Einstein on Locality and Separability." *Studies in History and Philosophy of Science* 16 (3): 171–201. [https://doi.org/10.1016/0039-3681\(85\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0039-3681(85)90001-9).
- . 1992. "Einstein and *Eindeutigkeit*: A Neglected Theme in the Philosophical Background to General Relativity." In *Studies in the History of General Relativity*, edited by J. Eisenstaedt and A. J. Kox, 3:154–243. Birkhauser.
- Leifer, Matthew Saul. 2014. "Is the Quantum State Real? An Extended Review of Ontology Theorems." *Quanta* 3 (1): 67–155. <https://doi.org/10.12743/quanta.v3i1.22>.
- Lewis, Peter G., David Jennings, Jonathan Barrett, and Terry Rudolph. 2012. "Distinct Quantum States Can Be Compatible with a Single State of Reality." *Physical Review Letters* 109 (15): 150404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.150404>.
- Neumann, John von. 1932. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Springer.
- Pearle, Philip. 1976. "Reduction of the State Vector by a Nonlinear Schrödinger Equation." *Physical Review D* 13 (4): 857–68. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.13.857>.
- . 2008. "Collapse Models." In *Open Systems and Measurement in Relativistic Quantum Theory*, 195–234. Springer. <https://doi.org/10.1007/bfb0104404>.
- Popescu, Sandu, and Daniel Rohrlich. 1994. "Quantum Nonlocality as an Axiom." *Foundations of Physics* 24 (3): 379–85. <https://doi.org/10.1007/BF02058098>.
- Pusey, Matthew F., Jonathan Barrett, and Terry Rudolph. 2012. "On the Reality of the Quantum State." *Nature Physics* 8 (6): 475.
- Rosenfeld, Benjamin, Daniel Burchardt, Robert Garthoff, Kai Redeker, Norbert Ortgel, Markus Rau, and Harald Weinfurter. 2017. "Event-Ready Bell Test Using Entangled Atoms Simultaneously Closing Detection and Locality Loopholes." *Physical Review Letters* 119 (1): 10402.
- Schrödinger, Erwin. 1935a. "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik." *Naturwissenschaften* 23.
- . 1935b. "Discussion of Probability Relations between Separated Systems." *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 31 (4): 555–63.
- Spekkens, Robert W. 2007. "Evidence for the Epistemic View of Quantum States: A Toy Theory." *Physical Review A* 75 (3): 32110.
- Vaidman, Lev. 2005. "The Reality in Bohmian Quantum Mechanics or Can You Kill with an Empty Wave Bullet?" *Foundations of Physics* 35 (2). <https://doi.org/10.1007/s10701-004-1945-2>.
- Weih, Gregor, Thomas Jennewein, Christoph Simon, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger. 1998. "Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions." *Physical Review Letters* 81 (23): 5039.